

Research Paper

Evaluating the impact of biological control on green oak leaf-roller (*Tortrix viridana* L.) populations and canopy recovery in Zagros Forests using remote sensing**Behzad Ghaznavi¹, Mohammad Reza Zargaran^{*2}, Seyed Rostam Mousavi Mirkala³ and Hadi Beygi Heidarlou⁴**

1- PhD. Student of Forestry, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (ghaznavibehzad1990@gmail.com)

2,*- (Corresponding author) Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (m.zargaran@urmia.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of watershed and rangeland, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (r.mousavi@urmia.ac.ir)

4- Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, I. R. Iran. (h.beygi@urmia.ac.ir)

Received: 04 January 2026

Revised: 18 February 2026

Accepted: 18 April 2026

Extended Abstract

Background and Objective: Defoliating insects are among the major factors threatening the health and sustainability of forest ecosystems. Climate change and rising global temperatures have contributed to increased frequency and geographical expansion of these pests in Iranian forests. The oak leaf-roller moth (*Tortrix viridana* L.) is one of the most important pests of oak forests, causing extensive defoliation, reduced photosynthetic capacity, and tree weakening through feeding on the leaves of coppice oak trees. Controlling this pest in the inaccessible areas of the Zagros Mountains requires environmentally friendly approaches. In this regard, biological agents such as *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) can serve as suitable alternatives to chemical pesticides. This study aimed to evaluate the effect of *Bt* spraying on the population density of the oak leaf-roller moth and to assess the potential of the NDVI vegetation index derived from Sentinel-2 imagery for monitoring pest-induced vegetation responses.

Material and Methods: This study was conducted over approximately 926 ha of oak forests in the Ghabrehosein area of Piranshahr County, northwestern Iran, which represents one of the major infestation hotspots of the oak leaf-roller moth. To control the pest, ground-based *Bt* spraying was carried out in May 2023 at a concentration of 1 kg per 100 L of water. The treatment effect was evaluated using a Before–After Control–Impact (BACI) design. In both control and treated areas, three 300-m sampling transects were established using a random-systematic approach, and 30 trees were selected along each transect at 30-m intervals. Larval density was assessed before spraying and one month after treatment. The effect of *Bt* on larval density was analyzed using a BACI linear mixed-effects model, with treatment, time, and their interaction considered as fixed effects and tree identity as a random effect. The percentage reduction in larval density was also calculated using the ΔD_{xt} index. To evaluate vegetation responses, NDVI was derived from Sentinel-2 Level-2A imagery during April–September 2023. Image processing and generation of NDVI time series at a

10-m spatial resolution were performed using the Google Earth Engine platform. The relationship between NDVI and larval density was evaluated using simple linear regression.

Results: The results showed that the mean larval density of *T. viridana* in the treated area decreased from 53.37 ± 15.74 larvae per tree before *Bt* application to 18.73 ± 7.26 larvae per tree after treatment. In contrast, only minor changes were observed in the control area, where mean larval density changed from 48.74 ± 12.25 to 47.03 ± 10.87 larvae per tree. The BACI linear mixed-effects model indicated a highly significant treatment $\times$ time interaction ($p < 0.001$), demonstrating the effectiveness of *Bt* application in reducing pest population density. Post-hoc comparisons confirmed a significant reduction in larval density in the treated area, whereas no significant change was observed in the control area. The ΔDxt index indicated that *Bt* spraying reduced larval density by approximately 65%, while changes in the control area remained within the range of natural population fluctuations. NDVI time-series analysis showed similar seasonal patterns in both areas; however, following treatment, NDVI values remained consistently higher in the treated area compared with the control. The smaller decline in NDVI in the treated area indicated better vegetation preservation and reduced feeding damage caused by larvae. Simple linear regression analysis revealed a significant positive relationship between NDVI and larval density in both areas before spraying. After treatment, this relationship became statistically non-significant in the treated area, indicating a reduced association between pest density and vegetation changes following *Bt* application.

Conclusion: The results demonstrated that biological spraying with *Bt* significantly reduced the population density of the oak leaf-roller moth, and based on the BACI design and linear mixed-effects model, this effect could be distinguished from natural pest population fluctuations in the control area. The reduction in larval feeding activity following *Bt* treatment was associated with the maintenance of higher NDVI values in the treated area, indicating reduced defoliation and improved vegetation condition. Furthermore, regression analysis showed that the relationship between NDVI and larval density became statistically insignificant after *Bt* application in the treated area, whereas it remained significant in the control area. Therefore, integrating field-based observations with NDVI derived from Sentinel-2 imagery can provide an effective approach for evaluating biological pest control and monitoring vegetation health at large spatial scales.

Keywords: Defoliation, Piranshahr, BACI design, Google Earth Engine, Integrated Pest Management (IPM).

How to Cite This Article: Ghaznavi, B., Zargarani, M. R., Mousavi Mirkala, S. R., and Beygi Heidarlou, H. (2026). Evaluating the impact of biological control on green oak leaf-roller (*Tortrix viridana* L.) populations and canopy recovery in Zagros Forests using remote sensing. Forest Research and Development, 12(2), 181-201. DOI: [10.30466/jfrd.2026.56954.1799](https://doi.org/10.30466/jfrd.2026.56954.1799)



Copyright ©2024 Ghaznavi et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

ارزیابی تأثیر کنترل بیولوژیک بر جمعیت پروانه جوانه‌خوار بلوط (*Tortrix viridana* L.) و بازیابی تاج‌پوشش در جنگل‌های زاگرس با استفاده از سنجش از دور

بهزاد غزنوی^۱، محمدرضا زرگران^{۲*}، سیدرستم موسوی‌میرکلا^۳ و هادی بیگی حیدرلو^۴

۱- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (ghaznavibehzad1990@gmail.com)

۲- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (m.zargaran@urmia.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (r.mousavi@urmia.ac.ir)

۴- استادیار، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. (h.beygi@urmia.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹

چکیده

مقدمه و هدف: آفات برگ‌خوار یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده سلامت و پایداری بوم‌سازگان‌های جنگلی محسوب می‌شوند. تغییرات اقلیمی و افزایش دمای جهانی، موجب افزایش فراوانی و گسترش جغرافیایی این آفات در جنگل‌های ایران شده است. پروانه جوانه‌خوار بلوط (*Tortrix viridana* L.) از جمله آفات مهم جنگل‌های بلوط است که با تغذیه از برگ‌های درختان شاخه‌زاد، موجب برگ‌زدایی، کاهش سطح فتوسنتزی و تضعیف درختان می‌شود. کنترل این آفت در مناطق صعب‌العبور زاگرس، نیازمند روش‌های سازگار با محیط‌زیست است. در این راستا، عوامل زیستی مانند *Bacillus thuringiensis* (Bt) می‌توانند جایگزین مناسبی برای آفت‌کش‌های شیمیایی باشند. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی Bt بر جمعیت پروانه جوانه‌خوار بلوط و ارزیابی قابلیت شاخص پوشش گیاهی NDVI استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 در پایش اثرات فعالیت آفت انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در سطحی حدود ۹۲۶ هکتار از جنگل‌های بلوط منطقه قبرحسین شهرستان پیرانشهر در شمال‌غرب ایران، به‌عنوان یکی از کانون‌های آلودگی پروانه جوانه‌خوار بلوط، انجام شد. برای کنترل آفت، محلول‌پاشی زمینی باکتری Bt با غلظت یک کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر آب در اردیبهشت ۱۴۰۲ انجام گرفت. ارزیابی اثر تیمار با استفاده از طرح قبل-بعد-شاهد-تیمار (BACI) انجام شد. در مناطق شاهد و تیمار، سه خط‌نمونه ۳۰۰ متری به‌صورت تصادفی-سیستماتیک مستقر و در هر خط، ۳۰ درخت با فاصله ۳۰ متر انتخاب شد. شمارش لاروها پیش از محلول‌پاشی و یک ماه پس از آن انجام گرفت. اثر Bt بر تراکم لاروها با استفاده از مدل خطی آمیخته BACI، با در نظر گرفتن تیمار، زمان و اثر متقابل آن‌ها به‌عنوان اثرهای

ثابت و شناسه درخت به عنوان اثر تصادفی، تحلیل شد. همچنین درصد کاهش تراکم لاروها با شاخص ΔDxt محاسبه شد. برای بررسی پاسخ پوشش گیاهی، شاخص NDVI از تصاویر Sentinel-2 Level-2A در دوره فروردین تا شهریور ۱۴۰۲ استخراج شد. پردازش تصاویر و تولید سری زمانی NDVI در مقیاس پیکسلی ۱۰ متر با استفاده از پلتفرم Google Earth Engine انجام و ارتباط بین NDVI و تراکم لاروها با رگرسیون خطی ساده ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که میانگین تراکم لاروهای *T. viridana* در منطقه تیمار پس از محلول‌پاشی Bt از $53/15 \pm 37/74$ به $18/73 \pm 7/26$ لارو در هر درخت کاهش یافت، درحالی‌که در منطقه شاهد تغییرات محدودی مشاهده شد و میانگین تراکم لاروها از $48/74 \pm 12/25$ به $47/03 \pm 10/87$ لارو در هر درخت رسید. نتایج مدل خطی آمیخته نشان داد که اثر متقابل تیمار $\times$ زمان از نظر آماری معنی‌دار بود ($p < 0.001$)، که بیانگر تأثیر مستقیم محلول‌پاشی Bt بر کاهش جمعیت آفت است. مقایسه‌های پس‌آزمون نیز کاهش معنی‌دار تراکم لاروها در منطقه تیمار و نبود تغییر معنی‌دار در منطقه شاهد را تأیید کرد. شاخص ΔDxt نشان داد که محلول‌پاشی Bt موجب کاهش حدود ۶۵ درصدی تراکم لاروها شد، درحالی‌که تغییرات منطقه شاهد در محدوده نوسانات طبیعی جمعیت آفت قرار داشت. تحلیل سری زمانی NDVI نشان داد که هر دو منطقه الگوی فصلی مشابهی داشتند، اما پس از تیمار، مقادیر NDVI در منطقه تیمار به‌طور پایداری بیشتر از شاهد باقی ماند. کاهش کمتر NDVI در منطقه تیمار نشان‌دهنده حفظ بهتر پوشش گیاهی و کاهش خسارت تغذیه‌ای لاروها بود. نتایج رگرسیون خطی نیز نشان داد که پیش از محلول‌پاشی، بین NDVI و تراکم لاروها در هر دو منطقه رابطه مثبت و معنی‌دار وجود داشت؛ اما پس از تیمار، این رابطه در منطقه تیمار غیرمعنی‌دار شد، که بیانگر کاهش ارتباط مستقیم فعالیت آفت با تغییرات پوشش گیاهی پس از کاربرد Bt است.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی زیستی با Bt به‌طور معنی‌داری موجب کاهش تراکم لاروهای پروانه جوانه‌خوار بلوط شد و بر اساس طرح BACI و مدل خطی آمیخته، این اثر از نوسانات طبیعی جمعیت آفت در منطقه شاهد تفکیک شد. کاهش فعالیت تغذیه‌ای لاروها پس از تیمار Bt با حفظ مقادیر بالاتر NDVI در منطقه تیمار همراه بود که نشان‌دهنده کاهش برگ‌خواری و حفظ توان فتوسنتزی درختان است. همچنین، تحلیل رگرسیون نشان داد که پس از محلول‌پاشی، ارتباط بین NDVI و تراکم لاروها در منطقه تیمار از نظر آماری غیرمعنی‌دار شد، درحالی‌که این رابطه در منطقه شاهد باقی ماند. بنابراین، تلفیق داده‌های میدانی و شاخص NDVI استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-2 می‌تواند روشی کارآمد برای ارزیابی کنترل زیستی آفات و پایش سلامت پوشش گیاهی در مقیاس‌های وسیع باشد.

واژه‌های کلیدی: برگ‌زدایی، پیرانشهر، طرح BACI، گوگل ارث انجین، مدیریت تلفیقی آفات (IPM).

مقدمه

جنگل‌های زاگرس که در امتداد دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس در غرب ایران گسترده شده‌اند، با قدمتی بیش از ۵۵۰۰ سال، یکی از ارزشمندترین منابع زیستی کشور و دومین بوم‌سازگان وسیع جنگلی ایران محسوب می‌شوند (Ghanbari Motlagh et al., 2020; Moradi et al., 2023). این بوم‌سازگان گسترده که بیش از سه میلیون هکتار را در اقلیم نیمه‌خشک دربر می‌گیرد (Beygi Heidarlou et al., 2024)، در بیش از ۷۰ درصد سطح خود از گونه‌های متنوع بلوط (*Quercus* spp.) تشکیل شده است (Haghighian et al., 2020).

گونه‌های بلوط به‌عنوان عناصر کلیدی بوم‌سازگان‌های زاگرس، طی دهه‌های اخیر به‌شدت تحت تأثیر پیامدهای تغییر اقلیم، گرمایش جهانی، افزایش رخداد خشکسالی و فشار عوامل تنش‌زای زیستی قرار گرفته‌اند. افزایش دما نه‌تنها به تضعیف فیزیولوژیکی درختان منجر شده، بلکه موجب تسریع رشد و افزایش تعداد نسل‌های سالانه آفات برگ‌خوار گرمادوست نیز شده است (Orgel et al., 2021; Hamann et al., 2021). شواهد جهانی حاکی از گسترش سریع آفات در اثر تغییر شرایط اقلیمی است (Ezzine et al., 2024) و خسارت‌های ناشی از این گونه آفات، سالانه میلیاردها دلار زیان اقتصادی به بخش منابع طبیعی و جنگلداری وارد می‌کند (Crimmins et al., 2020).

در میان عوامل تهدیدکننده جنگل‌های زاگرس، آفات برگ‌خوار از جایگاه برجسته‌ای برخوردارند. درختان بلوط در این بوم‌سازگان هر ساله توسط مجموعه‌ای از آفات مورد حمله قرار می‌گیرند که در بسیاری از موارد پیامدهای مخرب و طولانی‌مدت بجا می‌گذارند (Mannai et al., 2018). یکی از مهم‌ترین این آفات، پروانه جوانه‌خوار بلوط (*Tortrix viridana*)

(L.) است که طی چند دهه اخیر به‌ویژه در جنگل‌های غرب و شمال غرب کشور گسترش یافته و به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین آفات برگ‌خوار بلوط شناخته می‌شود (Ale-Hosseini et al., 2013; Zargarani et al., 2017). این آفت دارای یک نسل در سال بوده و حدود نه ماه از چرخه زندگی خود را در مرحله تخم سپری می‌کند (Kondur and Simsek, 2019). جوانه‌خوار بلوط در گستره‌ای وسیع شامل اروپا، شمال آفریقا، نواحی مدیترانه، قبرس و ایران پراکنش دارد و در سال‌های اخیر شدت خسارت آن در بسیاری مناطق افزایش یافته است (Haghighian et al., 2022).

پایش گسترده و مستمر تغییرات پوشش جنگلی با روش‌های زمینی سنتی بسیار زمان‌بر، پرهزینه و محدود به نقاط مشخص است. از این‌رو، فناوری‌های سنجنده دور به‌عنوان ابزاری نوین و مؤثر، امکان پایش اختلالات جنگلی مانند برگ‌زدایی ناشی از آفات را فراهم کرده است (Masek et al., 2015; Huang et al., 2021; Buzatu et al., 2023). شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) که با استفاده از بازتاب طیفی باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شود، یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در ارزیابی وضعیت سلامت پوشش گیاهی و تشخیص مناطق مبتلا به برگ‌زدایی است (Huang et al., 2021; Mohammadi et al., 2021). پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که آلودگی جنگل‌ها توسط آفات برگ‌خوار، موجب کاهش قابل توجه مقدار شاخص NDVI می‌شود (Liu et al., 2022; Buzatu et al., 2023; Mori et al., 2024). در ایران نیز پژوهش‌های مختلفی علاوه بر تأیید کارایی داده‌های ماهواره‌ای در پایش زوال بلوط (Mohammadi et al., 2021)، خشکیدگی درختان بلوط (Amir Ahmadi et al., 2015; Gooshbor et al., 2015)

نیز حفظ شود (Gui et al., 2001). در این میان، باکتری *Bacillus thuringiensis* (*Bt*) یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل بیولوژیک به‌شمار می‌رود که به‌طور طبیعی در خاک و محیط‌های مختلف یافت می‌شود و پروتئین‌های سمی اختصاصی برای کنترل لاروهای آفات تولید می‌کند (Tudoran et al., 2021). این باکتری که برای محیط‌زیست بی‌خطر است (Noda et al., 2009)، سال‌هاست در جنگلداری برای مدیریت آفات مهمی مانند ابریشم‌باف ناجور و کرم جوانه صنوبر به‌کار می‌رود (Tudoran et al., 2021). اگرچه پژوهش‌های مرتبط با تأثیر *Bt* بر کنترل *T. viridana* محدود بوده است، اما پژوهش‌های موجود نشان از کارایی قابل توجه آن دارند (Mannu et al., 2024; Akbari & Aramideh, 2024). با وجود این، ارزیابی اثربخشی محلول‌پاشی *Bt* در مقیاس ناحیه‌ای، مستلزم رویکردی ترکیبی است که بتواند داده‌های زمینی و سنجش از دور را همزمان مورد بررسی قرار دهد.

در چنین بستری، ضرورت بهره‌گیری از تلفیق داده‌های میدانی و اطلاعات ماهواره‌ای برای پایش دقیق‌تر شدت آلودگی، ارزیابی برگ‌زدایی و سنجش کارایی عملیات محلول‌پاشی *Bt* در جنگل‌های بلوط بیش از پیش برجسته می‌شود. از آنجا که تاکنون بررسی‌های اندکی به بررسی همزمان تغییرات NDVI و داده‌های زمینی جمعیت آفت، مقدار برگ‌خوری و مرگ و میر لارو در پی محلول‌پاشی پرداخته‌اند، این پژوهش تلاش دارد این خلأ علمی را پوشش دهد و تصویری جامع‌تر از تعامل میان تغییرات طیفی، شدت آلودگی و اثر کنترل بیولوژیک ارائه کند.

بر این اساس، این پژوهش به دنبال آن است که نشان دهد آیا تغییرات NDVI می‌تواند بازتاب‌دهنده قابل‌اعتماد تغییرات ناشی از فعالیت آفت جوانه‌خوار و همچنین تأثیر محلول‌پاشی *Bt* در سطح جنگل‌های

کاهش (al., 2016, Bagheri and Erfanfard, 2020)، معنی‌دار NDVI را در جنگل‌های آلوده به *T. viridana* گزارش کرده‌اند (Gooshbor et al., 2016; Haghighian et al., 2022; Seifi et al., 2024).

در پژوهش‌های سنجش از دور، اطلاعات مربوط به پوشش گیاهی عمدتاً از طریق اندازه‌گیری بازتاب امواج الکترومغناطیسی از تاج درختان و با استفاده از سنسورهای غیرفعال به‌دست می‌آید (Xue and Su, 2017). مقدار بازتاب طیف نوری از گیاهان تحت تأثیر عواملی مانند ترکیب گونه‌ای، محتوای آب بافت، ویژگی‌های بیوشیمیایی و مورفولوژیکی برگ‌ها و دیگر ویژگی‌های فیزیولوژیکی قرار دارد. بازتاب در باندهای قرمز (Red) و مادون‌قرمز نزدیک (NIR) به‌طور گسترده برای پایش وضعیت پوشش گیاهی به‌کار می‌رود (Huang et al., 2021)، زیرا این باندها با ویژگی‌هایی مانند محتوای کلروفیل، آب، کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌های برگ‌ی ارتباط مستقیم دارند (Foley et al., 1998; Batten, 1998). شاخص NDVI که از نسبت نرمال‌شده بازتاب در باندهای Red و NIR محاسبه می‌شود، به‌دلیل حساسیت بالا به تغییرات سطح برگ و ساختار تاج، ابزار مؤثری برای تشخیص کاهش سطح برگ و پدیده برگ‌زدایی در توده‌های متراکم جنگلی محسوب می‌شود (Hurley et al., 2014). از این‌رو، این شاخص می‌تواند برای پایش سلامت درختان بلوط و ارزیابی اثر فعالیت آفات برگ‌خوار مانند *T. viridana* به‌کار گرفته شود.

از سوی دیگر، استفاده گسترده از آفت‌کش‌های شیمیایی با خطرات زیست‌محیطی و افزایش مقاومت آفات همراه است (Ajuna et al., 2023). به همین دلیل، مدیریت یکپارچه آفات تأکید ویژه‌ای بر بهره‌گیری از عوامل طبیعی کنترل آفات دارد تا در کنار کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی، نقش دشمنان طبیعی آفات

بلوط باشد؟ همچنین بررسی این موضوع که آیا داده‌های زمینی جمع‌آوری شده (شامل تراکم لارو) با تغییرات طیفی ثبت شده توسط ماهواره رابطه معناداری دارند، می‌تواند به تقویت چارچوب‌های پایش آینده کمک کند؟ هدف کلی این پژوهش ایجاد پایه‌ای علمی برای بهره‌گیری از رویکرد تلفیقی سنجش از دور و داده‌های زمینی در مدیریت و پایش *T. viridana* در جنگل‌های شمال غرب ایران است؛ رویکردی که می‌تواند راهنمایی مؤثر برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی، تعیین مناطق بحرانی و ارزیابی راهکارهای کنترل بیولوژیک در مقیاسی وسیع فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی شامل حدود ۹۲۶ هکتار از جنگل‌های طبیعی واقع در منطقه قبر حسین در شهرستان پیرانشهر، استان آذربایجان غربی در شمال غرب ایران است (شکل ۱). این منطقه به دلیل قرار گرفتن در یکی از کانون‌های اصلی آلودگی به آفت پروانه جوانه‌خوار بلوط و گزارش‌های متعدد از شدت وقوع و گسترش این آفت (Zargar et al., 2017)، به عنوان عرصه پژوهش انتخاب شد. انتخاب این محدوده از آن رو اهمیت دارد که ترکیبی از شرایط بوم-شناسی حساس و گونه‌های چوبی غالب را در خود جای داده و نمونه‌ای شاخص از جنگل‌های بلوط زاگرس شمالی محسوب می‌شود.

پوشش چوبی منطقه، بیشتر از سه گونه مهم بلوط، شامل دارمازو (*Quercus infectoria* Oliv.)، ویول (*Q. libani* Oliv.) و برودار (*Q. brantii* Lindl.) تشکیل شده است. این سه گونه که در بخش‌های مختلف زاگرس پراکنش دارند، نقش کلیدی در پایداری زیست‌بوم‌های جنگلی منطقه داشته و به صورت غالب یا همراه، ساختار جنگل را شکل می‌دهند. افزون بر این‌ها، گونه‌های دیگری همچون زالزالک (*Crataegus* spp.)، بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) و گلابی وحشی (*Pyrus communis* L.) نیز در منطقه دیده می‌شوند که حضورشان بر تنوع ساختاری و کارکردی این جنگل‌ها می‌افزاید (Eshaghi-rad et al., 2016). این مجموعه گونه‌ای، سیمایی ناهمگون و نیمه‌متراکم از توده‌های جنگلی را شکل می‌دهد که حساسیت بوم-شناسی آنها در برابر تنش‌ها و عوامل مخرب، مانند آفات برگ‌خوار، از اهمیت زیادی برخوردار است.

دامنه ارتفاعی منطقه بین ۱۲۷۳ تا ۱۴۵۷ متر از سطح دریا تغییر می‌کند و این ناهمواری نقش بسزایی در تفاوت‌های خرداقلیمی، ترکیب گونه‌ای و شدت اثرگذاری آفات دارد. میانگین بارش سالانه منطقه، حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر است که آن را در زمره نواحی به نسبت پرباران زاگرس شمالی قرار می‌دهد. بر اساس منحنی آمبرژه، اقلیم این ناحیه در طبقه‌بندی اقلیم نیمه‌مرطوب سرد قرار می‌گیرد (Zargar et al., 2017)، که ویژگی‌هایی چون زمستان‌های سرد، تابستان‌های معتدل و رطوبت نسبی بالا را در دوره بارندگی نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت و گستره مکانی منطقه مورد بررسی

Figure 1. Location and spatial extent of the study area

روش انجام کار

محلول پاشی با باکتری *B. thuringiensis* (Bt)

برای کنترل جمعیت لاروهای سنین سوم و چهارم آفت پروانه جوانه خوار بلوط، عملیات محلول پاشی با استفاده از ترکیب بیولوژیک بایولپ (Biolap)، حاوی باکتری *B. thuringiensis* subsp. *Kurstaki* (تولید شرکت طبیعت یاور، ایران)، توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان غربی در سال ۱۴۰۲ اجرا شد. غلظت مصرفی محلول بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده و تأیید سازمان حفظ نباتات، برابر با یک

کیلوگرم در ۱۰۰ لیتر آب بود. در طی عملیات محلول-پاشی، تمام سطح برگ های درختان میزبان به منظور دستیابی به حداکثر کارایی، به طور کامل با محلول مذکور پوشش داده شد.

با توجه به حساسیت *Bt* به نور مستقیم خورشید و کاهش تدریجی فعالیت پروتئین های سمی (Cry toxins) در اثر تابش UV، عملیات محلول پاشی در ساعات بعد از ظهر و تحت کمترین شدت تابش انجام شد که در پژوهش های پیشین نیز به عنوان بهترین زمان کاربرد این باکتری گزارش شده است (Akbari &

(Aramideh, 2024). دوره انجام محلول‌پاشی از ۱۵ تا ۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۲ و به مدت تقریبی یک هفته ادامه داشت. تمامی مراحل، به صورت زمینی و با استفاده از تجهیزات پاشش دستی و نیمه‌مکانیزه اجرا شد تا یکنواختی پاشش و دقت آغشته‌سازی برگ‌ها افزایش یابد.

جمع‌آوری داده‌های میدانی و ارزیابی جمعیت لاروها

برای ارزیابی کمی اثر محلول‌پاشی *Bt* بر جمعیت لاروهای آفت، شمارش لاروها در دو مرحله زمانی انجام شد: (۱) پیش از آغاز محلول‌پاشی (۱۲، ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت ۱۴۰۲) به عنوان وضعیت پایه و (۲) یک ماه پس از عملیات محلول‌پاشی (۲۵ و ۲۶ خرداد ۱۴۰۲) با هدف بررسی اثرگذاری باکتری بر مرگ و میر یا کاهش تحرک لاروها (Elsharkawy et al., 2022). انتخاب این بازه زمانی با توجه به دوره اثر *Bt* و زمان لازم برای فعال‌شدن سم پروتئینی آن پس از تغذیه لاروها انجام شد.

برای حذف اثر تغییرات طبیعی زمانی و افزایش دقت در استنباط اثر محلول‌پاشی، یک منطقه شاهد (Control) نیز در نزدیکی منطقه تیمار انتخاب شد که از نظر ترکیب گونه‌ای، شرایط پستی و بلندی (توپوگرافی)، ارتفاع از سطح دریا، ساختار توده و شدت اولیه آلودگی به آفت، مشابه منطقه تیمار بود، اما هیچگونه عملیات محلول‌پاشی *Bt* یا دیگر روش‌های کنترلی در آن انجام نشد.

در منطقه شاهد نیز شمارش لاروها دقیقاً در همان دو مرحله زمانی و همزمان با منطقه تیمار انجام گرفت تا امکان مقایسه قبل و بعد و تفکیک اثر *Bt* از تغییرات طبیعی جمعیت آفت فراهم شود.

برای جمع‌آوری داده‌های میدانی، در هر یک از مناطق تیمار و شاهد سه خط‌نمونه (ترانسکت) به طول

۳۰۰ متر به روش تصادفی-سیستماتیک مستقر شد. نقطه شروع هر ترانسکت به صورت تصادفی انتخاب شد و در امتداد هر خط‌نمونه، ۳۰ قطعه‌نمونه (درخت بلوط) با فاصله ثابت ۳۰ متر مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب، در مجموع ۹۰ قطعه‌نمونه در منطقه تیمار و ۹۰ قطعه نمونه در منطقه شاهد برداشت شد. به منظور برقراری ارتباط بین داده‌های میدانی و سنجش از دور، مختصات دقیق هر درخت به وسیله دستگاه DGPS (GPS تفاضلی) ثبت شد تا استخراج مقادیر شاخص‌های گیاهی دقیقاً از پیکسل متناظر با تاج درخت انجام شود. این رویکرد مانع از ورود متغیرهای مزاحم ناشی از فضای خالی بین درختان در قطعات نمونه بزرگ مربعی شد. مناطق تیمار و شاهد از نظر ویژگی‌های شرایط پستی و بلندی (توپوگرافی) و تیپ جنگلی مشابه انتخاب شدند تا اثر عوامل محیطی غیرمدیریتی به حداقل برسد.

در هر قطعه‌نمونه، تعداد کل لاروهای پروانه جوانه‌خوار بلوط پیش و پس از محلول‌پاشی (در منطقه تیمار) و در بازه‌های زمانی متناظر (در منطقه شاهد) شمارش و ثبت شد.

تجزیه و تحلیل‌های آماری

بررسی پیش‌فرض‌های آماری و آزمون‌های تفاوت میانگین برای اطمینان از اعتبار تحلیل‌های آماری، ابتدا ماهیت توزیع داده‌های تعداد لاروهای *T. viridana* بررسی شد. اگرچه داده‌های جمعیت لاروها از نوع داده‌های شمارشی و غیرمنفی هستند، بررسی‌های اولیه نشان داد که با توجه به حجم نمونه به نسبت بالا، توزیع داده‌ها در هر دو منطقه تیمار و شاهد و در هر دو مرحله زمانی (قبل و بعد از محلول‌پاشی) به توزیع نرمال نزدیک است. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک (Shapiro-Wilk test) مورد ارزیابی قرار گرفت.

با این حال، با توجه به ساختار تودرتوی داده‌ها (درخت‌ها درون خط‌نمونه‌ها و خط‌نمونه‌ها درون مناطق تیمار و شاهد) و به‌منظور اجتناب از شبه‌تکرار و کنترل ناهمبستگی مکانی، تحلیل‌ها به آزمون‌های ساده مقایسه میانگین محدود نشد و از رویکردهای آماری چندمتغیره استفاده شد.

تحلیل اثر محلول‌پاشی Bt بر تراکم لاروها (طراحی (BACI

برای ارزیابی اثر واقعی محلول‌پاشی Bt بر جمعیت لاروهای پروانه جوانه‌خوار بلوط، تحلیل‌ها در قالب طراحی تأثیر قبل و بعد کنترل (Before-After Control-Impact; BACI) انجام شد. در این چارچوب، تغییرات تراکم لاروها در منطقه تیمار با تغییرات متناظر در منطقه شاهد و در بازه‌های زمانی مشابه مقایسه شد تا اثر محلول‌پاشی از تغییرات طبیعی زمانی و نوسانات جمعیتی تفکیک شود.

به‌این منظور، از مدل خطی آمیخته (Linear Mixed Model) استفاده شد که در آن تیمار (Bt) و شاهد، زمان (قبل و بعد از محلول‌پاشی) و برهم‌کنش تیمار $\times$ زمان به‌عنوان اثرهای ثابت در نظر گرفته شدند. همچنین خط‌نمونه و درخت نمونه به‌عنوان اثرهای تصادفی وارد مدل شدند تا وابستگی مکانی داده‌ها و تکرارهای درون‌گروهی کنترل شود. معنادار بودن برهم‌کنش تیمار $\times$ زمان به‌عنوان شاخص اصلی اثر محلول‌پاشی Bt بر کاهش تراکم لاروهای پروانه جوانه‌خوار بلوط تفسیر شد و در صورت معنی‌دار بودن این برهم‌کنش، مقایسه‌های پس‌آزمون با اعمال اصلاح بونفرونی برای بررسی تفاوت‌های جفتی انجام گرفت. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۷) انجام شد و سطح معنی‌داری آزمون‌ها در تمامی تحلیل‌ها برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شد.

محاسبه درصد کاهش تراکم لارو و ارزیابی اثربخشی Bt

برای ارائه یک شاخص توصیفی از مقدار کاهش جمعیت آفت، درصد کاهش تراکم لاروها نسبت به شرایط پایه محاسبه شد. درصد کاهش تراکم لاروها پس از فاصله زمانی مشخص از محلول‌پاشی با استفاده از رابطه زیر تعیین شد (Mannu et al., 2024):

$$\Delta D_{xt} = \frac{D_{x0} - D_{xt}}{D_{x0}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن:

D_{x0} = تراکم اولیه لاروها در زمان نمونه‌برداری قبل از محلول‌پاشی

D_{xt} = تراکم لاروها در روز t پس از محلول‌پاشی (در این پژوهش $t = 8$ روز)

ΔD_{xt} = درصد کاهش تراکم لاروها پس از عملیات محلول‌پاشی است.

برای حذف اثر تغییرات طبیعی جمعیت آفت، مقادیر درصد کاهش تراکم در منطقه تیمار با تغییرات متناظر در منطقه شاهد مقایسه شد و اختلاف این دو به‌عنوان شاخص اصلاح‌شده اثربخشی Bt تفسیر شد. این شاخص صرفاً به‌عنوان معیار مکمل توصیفی در کنار نتایج تحلیل‌های استنباطی مورد استفاده قرار گرفت و مبنای اصلی نتیجه‌گیری آماری قرار نگرفت.

فرآیند استخراج شاخص NDVI و پردازش تصاویر ماهواره‌ای برای پایش فعالیت آفت

در این پژوهش، از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در سطح پردازش Level-2A (Surface Reflectance) مربوط به سال ۱۴۰۲ (۲۰۲۳ میلادی) استفاده شد. تصاویر Level-2A شامل تصحیحات هندسی، رادیومتریک و اتمسفری هستند و به‌همین دلیل نیازی به انجام پیش‌پردازش اتمسفری اضافی نداشتند. باندهای مورد استفاده شامل قرمز (باند ۴، Red) و مادون‌قرمز نزدیک (باند ۸، NIR) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر بودند. تمامی پردازش‌ها، محاسبه شاخص NDVI و

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad \text{رابطه ۲}$$

پس از محاسبه NDVI برای هر تصویر، مقادیر این شاخص در مقیاس پیکسلی ۱۰ متر و به صورت نقطه‌ای برای هر یک از پلات‌های نمونه برداری استخراج شد. استخراج مقادیر NDVI به گونه‌ای انجام گرفت که برای هر پلات، یک سری زمانی کامل شامل مقادیر NDVI متناظر با تاریخ تمامی تصاویر ماهواره‌ای در دوره مورد بررسی تولید شود. تمامی مقادیر استخراج شده به همراه تاریخ تصویر و شناسه پلات‌ها در قالب فایل CSV ذخیره و برای تحلیل‌های آماری بعدی مورد استفاده قرار گرفتند.

علاوه بر استخراج سری زمانی NDVI برای هر پلات در کل دوره مورد بررسی، مقدار شاخص NDVI متناظر با تاریخ نمونه برداری میدانی و پیش از اجرای محلول‌پاشی *Bt* به صورت جداگانه استخراج شد تا امکان مقایسه مستقیم با داده‌های میدانی تراکم لاروهای *T. viridana* در شرایط پایه فراهم شود. همچنین، میانگین مقادیر NDVI در سطح پلات‌ها و در سطح کل منطقه مورد بررسی برای دو بازه زمانی قبل و بعد از محلول‌پاشی *Bt* محاسبه شد تا تغییرات شاخص NDVI در مناطق تیمار و شاهد به صورت مقایسه‌ای بررسی شود.

در نهایت، برای بررسی رابطه بین شاخص NDVI و تعداد لاروهای *T. viridana*، با توجه به توزیع نرمال داده‌ها، از رگرسیون خطی ساده استفاده شد تا قابلیت شاخص NDVI در پایش فعالیت آفت و ارزیابی اثربخشی محلول‌پاشی *Bt* به صورت کمی مشخص شود.

نتایج

آمار توصیفی تراکم لاروهای *T. viridana* در مناطق تیمار و شاهد

استخراج مقادیر پیکسلی با استفاده از پلتفرم پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) انجام شد.

برای کاهش اثر ابرناکی، پیکسل‌های ابری، سایه ابر، ابرهای با احتمال متوسط و زیاد، ابرهای نازک ارتفاع بالا (Cirrus) و برف با استفاده از لایه طبقه‌بندی صحنه (Scene Classification Layer – SCL) تصاویر سنتینل-۲ حذف شدند و تنها پیکسل‌های بدون ابر برای محاسبه شاخص NDVI مورد استفاده قرار گرفتند.

بازه زمانی مورد بررسی از ۲۱ مارس ۲۰۲۳ (۱ فروردین ۱۴۰۲) تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۲۳ (۳۱ شهریور ۱۴۰۲) انتخاب شد که این دوره، فصل رویش گیاهی، توسعه کامل برگ‌های بلوط و دوره اوج فعالیت تغذیه‌ای لاروهای *T. viridana* را دربر می‌گیرد. در این بازه، تمامی تصاویر در دسترس با تفکیک زمانی متوسط حدود چهار تا پنج روز مورد استفاده قرار گرفتند تا تغییرات زمانی شاخص NDVI با دقت مناسب ثبت شود.

برای تحلیل‌های سنجش از دور، تطابق مکانی قطعه‌نمونه‌های زمینی با پیکسل‌های تصاویر سنتینل-۲ (۱۰×۱۰ متر) اهمیت ویژه‌ای دارد. با توجه به ۹۰ قطعه نمونه میدانی برداشت شده و فاصله ۳۰ متری بین آنها، ۴۵ قطعه نمونه به صورت تصادفی و نماینده از مناطق شاهد انتخاب شدند و به صورت یک لایه وکتوری نقطه‌ای (پلات) به محیط GEE وارد شدند. این رویکرد با هدف کاهش اثر ناهمخوانی مقیاس (Scale mismatch) و افزایش قابلیت مقایسه داده‌های زمینی و ماهواره‌ای به کار گرفته شد و نمایندگی مناسبی از شرایط پوشش گیاهی و شدت فعالیت آفت در منطقه فراهم کرد.

شاخص NDVI با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Haghighian et al., 2022; Buzatu et al., 2023):

درحالی که پس از گذشت همان بازه زمانی متناظر با اجرای محلول پاشی در منطقه تیمار، میانگین تعداد لاروها در منطقه شاهد به $10/87 \pm 47/03$ لارو در هر درخت نمونه رسید. این تغییر اندک بیانگر نوسانات طبیعی جمعیت لاروها در غیاب هرگونه عملیات کنترلی است.

مقایسه مقادیر میانگین و پراکندگی داده‌ها نشان می‌دهد که درحالی که تغییرات تراکم لاروها در منطقه شاهد محدود بوده است، کاهش مشاهده شده در منطقه تیمار بسیار چشمگیرتر است. نتایج آمار توصیفی مربوط به تعداد لاروها در مناطق تیمار و شاهد، در دو مرحله زمانی قبل و بعد از محلول پاشی، در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج آمار توصیفی حاصل از بررسی ۹۰ قطعه نمونه در منطقه تیمار، شامل سه خط نمونه که هر یک دارای ۳۰ قطعه نمونه بودند، نشان داد که میانگین تعداد لاروهای *T. viridana* در مرحله پیش از اجرای محلول پاشی *Bt* برابر با $15/74 \pm 53/37$ لارو در هر درخت نمونه بوده است. پس از اجرای محلول پاشی، میانگین تعداد لاروها در منطقه تیمار به $7/26 \pm 18/73$ لارو در هر درخت کاهش یافت که بیانگر کاهش محسوس تراکم لاروها نسبت به وضعیت اولیه است.

در منطقه شاهد، که هیچگونه عملیات محلول پاشی در آن انجام نشد، نمونه برداری همزمان با منطقه تیمار و در همان دو مرحله زمانی انجام شد. میانگین تعداد لاروهای *T. viridana* پیش از زمان محلول پاشی برابر با $48/74 \pm 12/25$ لارو در هر درخت نمونه بود،

جدول ۱- آمار توصیفی تعداد لاروهای *T. viridana* در مناطق تیمار و شاهد قبل و بعد از محلول پاشی *Bt**

Table 1. Descriptive statistics of *T. viridana* larval abundance in treated and control areas before and after *Bt* application

منطقه	زمان نمونه برداری	میانگین	انحراف معیار
Region	Sampling time	Mean	SD
تیمار <i>Bt</i> <i>Bt</i> treatment	قبل از محلول پاشی Before <i>Bt</i> application	53.37	15.74
	بعد از محلول پاشی After <i>Bt</i> application	18.73	7.26
شاهد Control	قبل از محلول پاشی Before <i>Bt</i> application	48.74	12.25
	بعد از بازه زمانی متناظر After the corresponding time interval	47.03	10.87

* *Bt*: Bacterium *Bacillus thuringiensis*

* *Bt*: باکتری *Bacillus thuringiensis*

تراکم لاروها در منطقه تیمار پس از محلول پاشی *Bt* به طور معناداری با تغییرات طبیعی مشاهده شده در منطقه شاهد متفاوت بوده است. بنابراین، کاهش تراکم لاروها در منطقه تیمار را می‌توان به عنوان اثر واقعی و قابل تفکیک محلول پاشی *Bt* تفسیر کرد.

اثر محلول پاشی *Bt* بر تراکم لاروهای *T. viridana*

نتایج بررسی اثر محلول پاشی *Bt* بر تراکم لاروهای *T. viridana*، مدل خطی آمیخته در قالب طراحی BACI نشان داد که برهم کنش تیمار $\times$ زمان از نظر آماری بسیار معنی دار است ($z = -17.89$, $p < 0.001$) (جدول ۲). معنی دار بودن این برهم کنش بیانگر آن است که تغییرات

همچنین اثر اصلی زمان ($p < 0.001$, $z = 26.77$) و اثر اصلی تیمار ($p < 0.001$, $z = 22.67$) نیز معنی‌دار بودند که نشان‌دهنده تفاوت کلی تراکم لاروها بین زمان‌های نمونه‌برداری و بین مناطق تیمار و شاهد است. این نتایج به‌طور روشن نشان می‌دهد که محلول‌پاشی *Bt* نقش مؤثری در کاهش تراکم لاروهای *T. viridana* داشته و اثر آن فراتر از نوسانات طبیعی جمعیت آفت در منطقه شاهد بوده است. همچنین واریانس اثر تصادفی در سطح درخت نمونه (۱۱۹/۰۲) قابل توجه بود که بیانگر وجود ناهمگونی بین درختان از نظر تراکم لاروها و ضرورت استفاده از مدل آمیخته برای کنترل وابستگی داده‌ها است.

جدول ۲- نتایج مدل خطی آمیخته (طراحی BACI) برای بررسی اثر محلول‌پاشی *Bt* بر تراکم لاروهای *T. viridana*
Table 2. Results of the linear mixed-effects model (BACI design) assessing the effect of *Bt* spraying on the larval density of *T. viridana*

اثر ثابت	ضریب برآوردی	خطای استاندارد	آماره z	مقدار p
Fixed effect	Estimated coefficient	Standard error	z-statistic	p-value
عرض از مبدأ Intercept	18.76	1.47	12.77	<0.001
تیمار (شاهد در برابر <i>Bt</i>) Treatment (control vs. <i>Bt</i>)	29.31	1.29	22.67	<0.001
زمان (قبل در برابر بعد) Time (before vs. after)	34.61	1.29	26.77	<0.001
تیمار × زمان Treatment × Time	32.71-	1.83	17.89-	<0.001
Random effect variance of tree: 119.02				
واریانس اثر تصادفی درخت: ۱۱۹/۰۲				

درخت بوده و این کاهش از نظر آماری معنی‌دار است ($p < 0.001$).

در مقابل، در منطقه شاهد (بدون محلول‌پاشی)، تفاوت معنی‌داری بین دو زمان نمونه‌برداری مشاهده نشد؛ به‌طوری‌که میانگین تراکم لاروها از $12/25 \pm$ ۴۸/۷۴ لارو قبل از بازه زمانی متناظر به $10/87 \pm 47/03$ لارو پس از آن کاهش یافت و این تغییر از نظر آماری معنی‌دار نبود ($p > 0.05$).

همچنین مقایسه مقدار تغییرات قبل و بعد بین دو منطقه نشان داد که کاهش تراکم لاروها در منطقه تیمار به‌طور معنی‌داری بیشتر از تغییرات مشاهده‌شده در منطقه شاهد بود ($p < 0.001$).

نتایج مقایسه‌های پس‌آزمون تراکم لاروها

با توجه به معنی‌دار بودن برهم‌کنش تیمار × زمان در مدل خطی آمیخته، مقایسه‌های جفتی با اصلاح بونفرونی برای بررسی دقیق تفاوت‌ها انجام شد (جدول ۳).

نتایج نشان داد که در منطقه تیمار (*Bt*)، تراکم لاروهای *T. viridana* پس از محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری کاهش یافته است، به‌طوری‌که میانگین تراکم لاروها از $15/74 \pm 53/37$ لارو در هر درخت قبل از محلول‌پاشی به $7/26 \pm 18/73$ لارو پس از محلول‌پاشی کاهش یافت. تفاوت میانگین برابر با $34/64$ لارو در هر

جدول ۳- نتایج مقایسه‌های جفتی تراکم لاروهای *T. viridana* بین تیمارها و زمان‌های نمونه‌برداری (اصلاح بونفرونی)

Table 3. Results of pairwise comparisons of *T. viridana* larval density between treatments and sampling times (Bonferroni adjustment)

مقایسه Comparison	تفاوت میانگین (لارو/درخت) Mean difference (larvae per tree)	خطای استاندارد Standard error	سطح معنی‌داری (مقدار p) Significance level (p -value) *
تیمار <i>Bt</i> (قبل - بعد) <i>Bt</i> treatment (before - after)	34.64	1.93	< 0.001
منطقه شاهد (قبل - بعد) Control area (before - after)	1.71	1.42	0.281
اختلاف تغییرات (<i>Bt</i> - شاهد) Difference in changes (<i>Bt</i> - control)	32.93	2.15	< 0.001

* مقادیر P با استفاده از اصلاح بونفرونی تعدیل شدند.

P -values were adjusted using the Bonferroni correction.

از یک الگوی فصلی مشابه پیروی می‌کنند (شکل ۲). افزایش تدریجی NDVI از اوایل فصل بهار آغاز شد و در اواخر اردیبهشت تا اوایل خرداد به مقادیر بیشینه خود رسید، سپس از خرداد به بعد کاهش تدریجی NDVI مشاهده شد که تا پایان دوره مورد بررسی ادامه یافت.

در دوره پیش از محلول‌پاشی *Bt* (یک فروردین تا پنج خرداد)، NDVI در منطقه شاهد اندکی بالاتر از منطقه تیمار بود. در این بازه، NDVI منطقه شاهد از ۰/۲۶ در ۲۱ مارس (یک فروردین) به ۰/۵۷ در هشت می (۱۸ اردیبهشت) رسید، درحالی‌که در منطقه تیمار از ۰/۲۳ به ۰/۵۵ افزایش یافت. اختلاف بین دو منطقه محدود و به نسبت پایدار بود و تغییر ناگهانی یا واگرایی شدیدی مشاهده نشد. در همین دوره، لاروهای جوانه‌خوار بلوط در هر دو منطقه فعال بودند و با شروع تغذیه از جوانه‌ها، می‌توانستند کاهش پوشش گیاهی را به‌صورت جزئی ایجاد کنند، اما این اثر در شاخص NDVI هنوز مشخص نبود.

پس از اجرای محلول‌پاشی *Bt*، از اوایل خرداد، الگوی NDVI و فعالیت لاروها تغییر کرد. NDVI منطقه شاهد کاهش بیشتری را تجربه کرد و عمدتاً در

درصد کاهش تراکم لاروهای *T. viridana* پس از محلول‌پاشی *Bt*

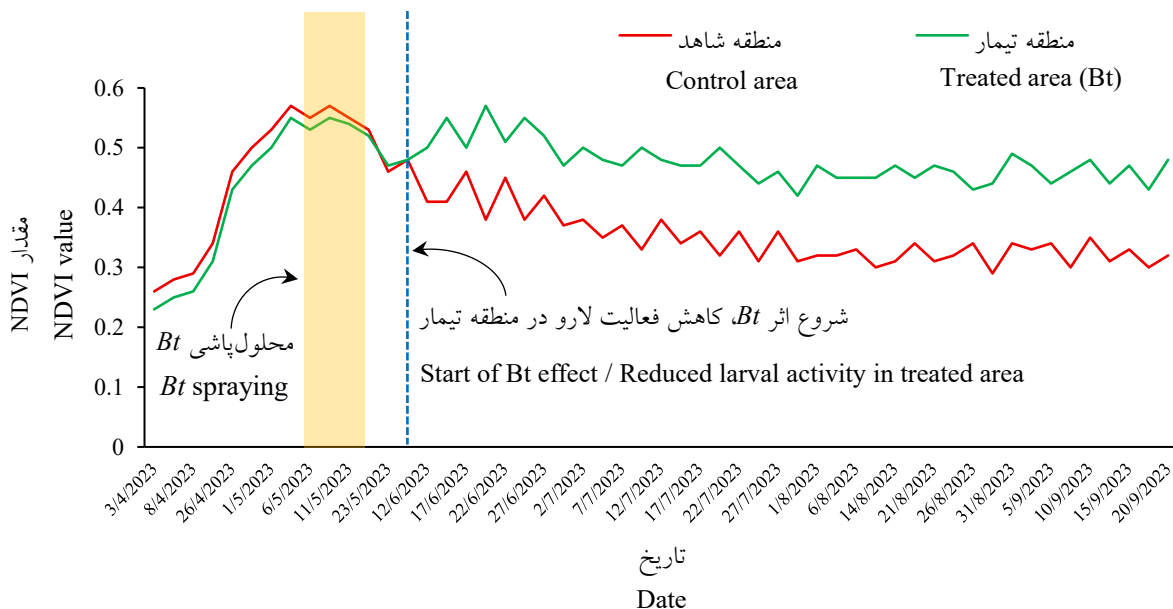
نتایج محاسبه درصد تغییر تراکم لاروهای *T. viridana* نشان داد که در منطقه تیمار *Bt*، درصد کاهش تراکم لاروها پس از محلول‌پاشی (ΔDxt) به‌طور میانگین ۶۴/۷۸ درصد بوده است، به‌طوری‌که مقادیر کمینه و بیشینه کاهش به ترتیب ۳۶ و ۸۵ درصد برآورد شد. بدین ترتیب، حدود یک هفته پس از اجرای محلول‌پاشی، تراکم لاروها در درختان نمونه به‌طور متوسط نزدیک به ۶۵ درصد کاهش یافت.

در مقابل، در منطقه شاهد که هیچگونه عملیات محلول‌پاشی در آن انجام نشد، محاسبه درصد تغییر تراکم لاروها در بازه زمانی متناظر نشان داد که مقدار تغییرات جمعیت محدود بوده است. بر اساس نتایج، میانگین درصد تغییر تراکم لاروها در این منطقه حدود ۳/۵ درصد کاهش را نشان داد که بیانگر تغییرات اندک تراکم لاروها در شرایط بدون مداخله مدیریتی است.

تغییرات زمانی شاخص NDVI در مناطق شاهد و تیمار تحلیل سری زمانی شاخص NDVI در بازه ۲۱ مارس ۲۰۲۳ (۱ فروردین ۱۴۰۲) تا ۲۲ سپتامبر ۲۰۲۳ (۳۱ شهریور ۱۴۰۲) نشان داد که هر دو منطقه شاهد و تیمار

در طول تیر و مرداد، این تفاوت پایدار باقی ماند؛ به‌عنوان مثال، در ۲۹ تیر، NDVI منطقه شاهد ۰/۳۲ و منطقه تیمار ۰/۵۰ ثبت شد. در بخش پایانی دوره مورد بررسی (۱۰ تا ۳۱ شهریور)، اختلاف NDVI بین دو منطقه همچنان حفظ شد و NDVI منطقه تیمار در اغلب تاریخ‌ها ۰/۱۶-۰/۰۴ واحد بالاتر از منطقه شاهد بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اثر محلول‌پاشی *Bt* بر کاهش فعالیت لاروها و حفظ پوشش گیاهی در منطقه تیمار پایدار باقی ماند.

بازه ۰/۳۰-۰/۴۲ باقی ماند، که با ادامه فعالیت لاروهای بلوط و تغذیه از جوانه‌ها همزمان بود. در مقابل، در منطقه تیمار، مقادیر بالاتری از NDVI (۰/۴۲ - ۰/۵۷) حفظ شد و نوسانات کمتری داشت. این روند نشان می‌دهد که محلول‌پاشی *Bt* سبب کاهش چشمگیر جمعیت لاروها در منطقه تیمار شد و فعالیت تغذیه‌ای آنها به حداقل رسید، درحالی‌که در منطقه شاهد، لاروها همچنان فعال بودند و بخشی از کاهش NDVI مرتبط با تغذیه آنها بود.



شکل ۲- تغییرات زمانی NDVI در مناطق شاهد و تیمار و اثر محلول‌پاشی *Bt* بر فعالیت لارو جوانه‌خوار بلوط
Figure 2. Temporal changes of NDVI in control and *Bt*-treated areas and the effect on *T. viridana* larval activity

تحلیل رگرسیون تراکم لارو و NDVI در مناطق شاهد و تیمار
تحلیل رگرسیون خطی ساده بین NDVI و تراکم لاروهای جوانه‌خوار بلوط نشان داد که الگوهای رابطه قبل و بعد از محلول‌پاشی *Bt* در دو منطقه شاهد و تیمار متفاوت است (جدول ۴).
در منطقه شاهد، قبل از محلول‌پاشی، تراکم لاروها با NDVI همبستگی مثبت و معنادار داشت ($B = 48.2$ ، $R^2 = 0.36$ ، $p = 0.007$). پس از اجرای محلول‌پاشی *Bt*، تراکم لاروها به شدت کاهش یافت و

تحلیل رگرسیون تراکم لارو و NDVI در مناطق شاهد و تیمار
تحلیل رگرسیون خطی ساده بین NDVI و تراکم لاروهای جوانه‌خوار بلوط نشان داد که الگوهای رابطه قبل و بعد از محلول‌پاشی *Bt* در دو منطقه شاهد و تیمار متفاوت است (جدول ۴).
در منطقه شاهد، قبل از محلول‌پاشی، تراکم لاروها با NDVI همبستگی مثبت و معنادار داشت ($B = 48.2$ ، $R^2 = 0.36$ ، $p = 0.007$). پس از اجرای محلول‌پاشی *Bt*، تراکم لاروها به شدت کاهش یافت و

رابطه NDVI با تراکم لارو تقریباً از بین رفت ($B = 5.2$, $R^2 = 0.04$, $p = 0.34$). این نتایج نشان می‌دهد که محلول‌پاشی *Bt* به طور مؤثری فعالیت لاروها را در منطقه تیمار کاهش داده و اثر آن پایدار بوده است. این نتایج به وضوح تأثیر محلول‌پاشی بیولوژیک را بر چرخه زندگی لاروها نشان می‌دهند و همچنین بر اساس NDVI، پوشش گیاهی منطقه تیمار نسبت به منطقه شاهد حفظ شد.

جدول ۴- نتایج رگرسیون خطی ساده بین شاخص NDVI و تراکم لارو جوانه‌خوار بلوط در مناطق شاهد و تیمار، قبل و بعد از محلول‌پاشی *Bt*

Table 4. Results of simple linear regression between NDVI and oak budworm larval density in control and Bt-treated areas before and after application

منطقه	دوره زمانی	ضریب شیب (B)	مقدار ثابت	R ²	مقدار p
Region	Time period	Slope (B)	Intercept		P-value
شاهد	قبل از محلول‌پاشی Before spraying	48.2	-14.5	0.42	0.003**
Control					
تیمار <i>Bt</i>	بعد از محلول‌پاشی After spraying	41.5	-9.7	0.36	0.007*
Bt treatment					
شاهد	قبل از محلول‌پاشی Before spraying	35.7	-5.8	0.28	0.021 ^{ns}
Control					
تیمار <i>Bt</i>	بعد از محلول‌پاشی After spraying	5.2	8.6	0.04	0.340 ^{ns}
Bt treatment					

* و ** به ترتیب نشان‌دهنده معناداری در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ و ns بیانگر عدم معناداری آماری است.

*, ** indicate statistical significance at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively; ^{ns} indicates non-significant relationships.

بحث

کاهش قابل توجه تراکم لاروها پس از محلول‌پاشی *Bt* با یافته‌های پژوهش‌های پیشین (Mannu et al., 2024, Fuentealba et al., 2019, Mannu et al., 2024) همخوانی دارد. (Bauce et al., 2024) کاهش حدود ۷۰ درصدی تراکم لاروهای برگ‌خوار را پس از محلول‌پاشی هوایی *Bt* در جنگل‌های بلوط ایتالیا گزارش کردند، در همین حال (Fuentealba et al., 2019) و (Bauce et al., 2024) نیز اثربخشی بالای *Bt* را در کنترل آفات برگ‌خوار، به‌ویژه در مراحل لاروی اولیه، تأیید کرده‌اند. شباهت نتایج پژوهش حاضر با این پژوهش‌ها را می‌توان به همزمانی محلول‌پاشی با مراحل فعال تغذیه لاروها و مرحله حساس فنولوژیکی میزبان نسبت داد.

نتایج این پژوهش به‌طور روشن نشان داد که محلول‌پاشی با باکتری *Bt* موجب کاهش چشمگیر و معنادار تراکم لاروهای جوانه‌خوار بلوط (*T. viridana*) در منطقه تیمار شده است. بر اساس نتایج آمار توصیفی و مدل خطی آمیخته (طراحی BACI)، میانگین تراکم لاروها در منطقه تیمار پس از محلول‌پاشی حدود ۶۵ درصد کاهش یافت، درحالی‌که در منطقه شاهد تغییرات بسیار محدود و در حد نوسانات طبیعی جمعیت مشاهده شد. معنی‌دار بودن برهم‌کنش تیمار × زمان در مدل BACI ($p < 0.001$) نشان می‌دهد که کاهش مشاهده‌شده در منطقه تیمار را نمی‌توان به تغییرات طبیعی زمانی نسبت داد، بلکه این کاهش نتیجه مستقیم مداخله مدیریتی با *Bt* بوده است.

از دیدگاه بوم‌شناختی، زمان‌بندی صحیح محلول‌پاشی نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت کنترل بیولوژیک دارد. در این پژوهش، محلول‌پاشی *Bt* در دوره‌ای انجام شد که لاروهای *T. viridana* در مرحله تغذیه فعال از جوانه‌ها و برگ‌های تازه بودند، مرحله‌ای که حساس‌ترین فاز چرخه زندگی آفت نسبت به *Bt* محسوب می‌شود. این موضوع با یافته‌های Mannu et al. (2024) همخوانی دارد که بیشترین کارایی *Bt* را در همزمانی با توسعه اولیه برگ‌ها و فعالیت لاروی گزارش کردند.

تحلیل سری زمانی شاخص NDVI نشان داد که هر دو منطقه شاهد و تیمار از الگوی فصلی مشابهی پیروی می‌کنند، اما پس از محلول‌پاشی *Bt*، تفاوت مشخصی بین دو منطقه شکل گرفت. پیش از محلول‌پاشی، اختلاف NDVI بین مناطق محدود بود و همزمانی فعالیت لاروها در هر دو منطقه سبب شد که اثر تغذیه‌ای آنها هنوز به‌صورت آشکار در NDVI منعکس نشود. با این حال، پس از اجرای محلول‌پاشی، کاهش فعالیت لاروها در منطقه تیمار با حفظ مقادیر بالاتر NDVI همراه شد، درحالی‌که در منطقه شاهد، ادامه فعالیت لاروها با کاهش بیشتر NDVI همزمان بود.

این الگو نشان می‌دهد که شاخص NDVI قادر است به‌صورت غیرمستقیم تغییرات ناشی از فعالیت آفات برگ‌خوار را در مقیاس زمانی و مکانی مناسب منعکس کند. کاهش NDVI در منطقه شاهد را می‌توان به تداوم تغذیه لاروها از جوانه‌ها و برگ‌ها نسبت داد که منجر به کاهش سطح فتوسنتزی و بازتاب در باند مادون‌قرمز نزدیک می‌شود. در مقابل، کاهش شدید تراکم لاروها در منطقه تیمار موجب شد که پوشش گیاهی توانایی بازایی خود را حفظ کند و NDVI در سطوح بالاتری باقی بماند.

یافته‌های این پژوهش با نتایج بررسی‌های پیشین همخوانی دارد. (Hawrylo et al. (2018 و Spruce et al. (2019 نشان دادند که شاخص‌های گیاهی مبتنی بر سنجش از دور، مانند NDVI، ابزار مؤثری برای پایش خسارت ناشی از آفات برگ‌خوار هستند. همچنین Haghghian et al. (2022 در جنگل‌های بلوط ایران گزارش کردند که کاهش NDVI به‌طور معناداری با افزایش شدت خسارت آفات همبستگی دارد. نتایج حاضر با یافته‌های Gooshbor et al. (2016 در زمینه کاهش معنی‌دار شاخص NDVI پس از طغیان *T. viridana* در جنگل‌های بلوط زاگرس همسو است. درحالی‌که پژوهش مذکور بر تغییرات بین‌ساله ناشی از خسارت آفت تمرکز داشت، پژوهش حاضر پاسخ کوتاه‌مدت و درون‌فصلی این شاخص را به اقدامات کنترلی (محلول‌پاشی *Bt*) ارزیابی کرد. این هم‌راستایی، بیانگر کارایی NDVI نه تنها در آشکارسازی طغیان‌های گسترده، بلکه در سنجش دقیق اثربخشی مداخلات مدیریتی است.

نتایج رگرسیون خطی ساده نشان داد که رابطه NDVI و تراکم لاروهای *T. viridana* به‌طور محسوسی تحت تأثیر محلول‌پاشی *Bt* قرار گرفت. پیش از محلول‌پاشی، در هر دو منطقه شاهد و تیمار، رابطه‌ای مثبت و معنادار بین NDVI و تراکم لاروها مشاهده شد. این همبستگی مثبت بیانگر یک واقعیت بوم‌شناسی در جنگل‌های بلوط است که با شروع فصل رویش و توسعه تاج پوشش (افزایش NDVI)، منابع غذایی در دسترس و آشیان زیستی برای لاروهای جوان افزایش می‌یابد. در واقع، درختانی که دارای تراکم برگی زیادتر و وضعیت فیزیولوژیک بهتری هستند (NDVI زیادتر)، جذابیت بیشتری برای تخم‌گذاری پروانه‌های ماده در سال قبل داشته و یا توانایی حمایت از جمعیت‌های بزرگ‌تری از

لاروها را در ابتدای فصل دارند. این یافته با نتایج Seifi et al. (2023) همخوانی کامل دارد، آنها نیز گزارش کردند که بین جمعیت آفت جوانه‌خوار بلوط و شاخص NDVI رابطه مثبت و معنی‌داری وجود دارد و تأکید کردند که تراکم آفت در مناطق با تراکم پوشش گیاهی زیاده‌تر، بیش از دیگر نقاط است. همچنین این مدل از رابطه مثبت توسط Abd El-Ghany et al. (2020) نیز گزارش شده است که در آن شاخص‌های گیاهی به‌عنوان عاملی برای پیش‌بینی مناطق با پتانسیل بالای طغیان آفت معرفی شده‌اند.

پس از محلول‌پاشی، این رابطه در منطقه تیمار تقریباً از بین رفت و از نظر آماری غیرمعنادار شد. حذف این ارتباط بیانگر آن است که مداخله مدیریتی (محلول‌پاشی *Bt*) باعث گسست رابطه طبیعی بین وضعیت پوشش گیاهی و فعالیت آفت شده است؛ به‌طوری‌که باوجود وجود توده برگی مناسب، جمعیت آفت به‌شدت سرکوب شده است. در مقابل، در منطقه شاهد، رابطه مثبت هرچند با ضریب تبیین ضعیف‌تر ($R^2 = 0.28$)، همچنان برقرار باقی ماند. تداوم این رابطه مثبت در منطقه شاهد نشان‌دهنده پایداری چرخه طبیعی تعامل آفت-میزبان در غیاب مداخله انسانی است، هرچند تضعیف این رابطه در اواخر فصل را می‌توان به تخریب بخشی از بافت‌های برگی توسط لاروهای سنبل بالا و کاهش کیفیت میزبان نسبت داد (Mngadi et al., 2024). به‌طورکلی، تأیید رابطه مثبت بین NDVI و تراکم اولیه آفت، پتانسیل بالای این شاخص را به‌عنوان یک ابزار پیش‌آگهی برای شناسایی کانون‌های حساس به طغیان در مدیریت جنگل نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی کنترل بیولوژیک با استفاده از *Bt* و پایش سنسجش از دور، رویکردی

کارآمد برای مدیریت آفت جوانه‌خوار بلوط (T. viridana) در جنگل‌های ایران است. نتایج به‌وضوح بیانگر آن است که اجرای محلول‌پاشی *Bt* در زمان مناسب و هماهنگ با مراحل فنولوژیکی حساس درختان، منجر به کاهش سریع و معنادار تراکم لاروها می‌شود، کاهشی که بر اساس طراحی BACI از نوسانات طبیعی جمعیت آفت قابل تفکیک بود. همزمان، تحلیل شاخص NDVI استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ نشان داد که این مداخله با کاهش شدت برگ‌زدایی و حفظ وضعیت پوشش گیاهی همراه بوده و به بهبود تدریجی سلامت تاج درختان منجر شده است. این همخوانی میان داده‌های میدانی و شاخص‌های سنسجش از دور، توانمندی رویکرد یکپارچه را برای پایش پهنه‌های وسیع جنگلی و ارزیابی کمی اثربخشی اقدامات مدیریتی تأیید می‌کند.

با توجه به افزایش فشار آفات برگ‌خوار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت گذار از رویکردهای کنترلی واکنشی به سمت نظام‌های مدیریت پیش‌آگاهانه و پایدار تأکید دارد. تلفیق کنترل بیولوژیک، به‌عنوان روشی هدفمند و سازگار با محیط‌زیست، با فناوری سنسجش از دور، امکان شناسایی زودهنگام کانون‌های آلودگی، بهینه‌سازی زمان و مکان مداخله و پایش مستمر پیامدهای بوم‌شناختی را فراهم می‌آورد و می‌تواند کارایی مدیریت را در مقیاس‌های منطقه‌ای افزایش دهد.

با این حال، محدودیت‌هایی مانند اجرای تیمار در یک مقطع زمانی و نبود داده‌های بلندمدت ایجاب می‌کند که تعمیم نتایج با احتیاط انجام شود. پژوهش‌های آینده می‌توانند با بررسی اثر تیمارهای تکراری، نقش متغیرهای اقلیمی و مقایسه روش‌های مختلف کاربرد *Bt* (زمینی و هوایی)، به تقویت و تکمیل این چارچوب مدیریتی کمک کنند. در مجموع، الگوی

بوم‌سازگان‌های جنگلی مشابه در ایران و مناطق هم‌اقلیم
مورد استفاده قرار گیرد.

ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی علمی
برای طراحی برنامه‌های مدیریت آفات در دیگر

References

- Abd El-Ghany, N. M.; Abd El-Aziz, S. E.; Marei, S. S. A review: Application of remote sensing as a promising strategy for insect pests and diseases management. *Environmental Science and Pollution Research* **2020**, 27(27), 33503–33515.
- Ajuna, H. B.; Lim, H. I.; Moon, J. H.; Won, S. J.; Choub, V.; Choi, S. I.; Yun, J. Y.; Ahn, Y. S. The Prospect of Hydrolytic Enzymes from *Bacillus* Species in the Biological Control of Pests and Diseases in Forest and Fruit Tree Production. *International Journal of Molecular Sciences* **2023**, 24 (23), 16889.
- Akbari, S.; Aramideh, S. Effect of salicylic acid isolated from three native willow species in combination with *Bacillus thuringiensis* on the oak leaf roller, *Tortrix viridana* L. *Forest Research and Development* **2024**, 10(3), 395–409. (In Persian).
- Ale-Hosseini, S. A.; Saadati, H.; Zarghabi, H. Population changes of *Tortrix viridana* L. (Lepidoptera: Tortricidae) and the identification of its natural enemies in Fars province. *Iranian Journal of Plant Protection* **2013**, 5(1), 1–12. (In Persian).
- Amir Ahmadi, B.; Zolfaghari, R.; Mirzaei, M. R. Relation between dieback of *Quercus brantii* Lindl. trees with ecological and silvicultural factors (study area: Dena Protected Area). *Ecology of Iranian Forest* **2015**, 3(6), 19–27. (In Persian).
- Bagheri, R.; Erfanifard, Y. Spatial distribution of Persian oak decline using a combination of geostatistical techniques and remote sensing (Case study: Barm Plain, Fars Province). *Journal of RS and GIS for Natural Resources* **2020**, 11(1), 104–120. (In Persian).
- Batten, G. D. Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: The potential and the limitations. In *Australian Journal of Experimental Agriculture*; Australia, **1998**; p. 697.
- Bauce, É.; Dupont, A.; Hébert, C.; Berthiaume, R.; Quezada-García, R.; Fuentealba, A. Biennial Aerial Application of *Bacillus thuringiensis* Berliner var. *kurstaki* Is the Most Cost-Effective Approach of Protection against Spruce Budworm (*Choristoneura fumiferana* [Clemens]). *Annals of Forest Science* **2024**, 81 (1), 40.
- Beygi Heidarlou, H.; Karamat Mirshekarlou, A.; Lopez-Carr, D.; Borz, S. A. Conservation policy and forest transition in Zagros forests: Statistical analysis of human welfare, biophysical, and climate drivers. *Forest Policy and Economics* **2024**, 161, 103177.
- Buzatu, A.; Nețoiu, C.; Apostol, B.; Badea, O. The use of remote sensing indices derived from Sentinel-2 satellite images for the defoliation damage assessment of *Lymantria dispar*. *Annals of Forest Research* **2023**, 66(1), 123–138.
- Crimmins, T. M.; Gerst, K. L.; Huerta, D. G.; Marsh, R. L.; Posthumus, E. E.; Rosemartin, A. H.; Whitmore, M. Short-term forecasts of insect phenology inform pest management. *Annals of the Entomological Society of America* **2020**, 113(2), 139–148.
- Elsharkawy, M. M.; Almasoud, M.; Alsulaiman, Y. M.; Baeshen, R. S.; Elshazly, H.; Kadi, R. H.; Shower, R. Efficiency of *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus cereus* against *Rhynchophorus ferrugineus*. *Insects* **2022**, 13(10), 905.
- Eshaghi-Rad, J.; Motallebpour, A.; Alijanpour, A. Association survey between oak species in relation to physiographic factors in Zagros forest (Case study: Sardasht Forest, Rabat). *Forest Research and Development* **2016**, 1(4), 285–294. (In Persian).
- Ezzine, O.; Yangu, I.; Hlaïem, S.; Mannai, Y.; Khadraoui, H.; Ben Jamâa, M. L. Dynamics of native insects and pathogenic fungi in Tunisian oak forests (North Africa). *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* **2024**, 10(3), 1977–1990.
- Foley, W. J.; McIlwee, I.; Lawler, L.; Aragones, A.; Woolnough, P.; Berding, N. Ecological applications of near infrared reflectance spectroscopy: A tool for rapid, cost-effective prediction of the composition of plant and animal tissues and aspects of animal performance. In *Oecologia*; Springer: Berlin, **1998**; pp. 293–305.
- Fuentealba, A.; Dupont, A.; Hébert, C.; Berthiaume, R.; Quezada-García, R.; Bauce, É. Comparing the Efficacy of Various Aerial

- Spraying Scenarios Using *Bacillus thuringiensis* to Protect Trees from Spruce Budworm Defoliation. *Forest Ecology and Management* **2019**, 432, 1013–1021.
- Ghanbari Motlagh, M.; Amraei, B.; Halimi, M. Evaluating the hazardous potential of the dieback of the Zagros oak forests using the multi-criteria decision-making methods. *Arabian Journal of Geosciences* **2020**, 13(19), 995.
- Gooshbor, L.; Bavaghar, M. P.; Amanollahi, J.; Ghobari, H. Monitoring infestations of oak forests by *Tortrix viridana* (Lepidoptera: Tortricidae) using remote sensing. *Plant Protection Science* **2016**, 52(4), 270–276.
- Gui, L.; Xiang-yue, Z.; Lu-quan, W. The use of *Bacillus thuringiensis* on forest integrated pest management. *Journal of Forestry Research* **2001**, 12, 51–54.
- Haghighian, F.; Yousefi, S.; Keesstra, S. Identifying tree health using Sentinel-2 images: A case study on *Tortrix viridana* L.-infected oak trees in Western Iran. *Geocarto International* **2022**, 37(1), 304–314.
- Hamann, E.; Blevins, C.; Franks, S. J.; Jameel, M. I.; Anderson, J. T. Climate change alters plant–herbivore interactions. *New Phytologist* **2021**, 229(4), 1894–1910.
- Hawryło, P.; Bednarz, B.; Wężyk, P.; Szostak, M. Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2. *European Journal of Remote Sensing* **2018**, 51(1), 194–204.
- Huang, S.; Tang, L.; Hupy, J. P.; Wang, Y.; Shao, G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research* **2021**, 32(1), 1–6.
- Hurley, M. A.; Hebblewhite, M.; Gaillard, J.-M.; Dray, S.; Taylor, K. A.; Smith, W. K.; Zager, P.; Bonenfant, C. Functional analysis of normalized difference vegetation index curves reveals overwinter mule deer survival is driven by both spring and autumn phenology. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*; The Royal Society: London, **2014**; pp. 20130196.
- Kondur, Y.; Şimşek, Z. Biology and damage of *Tortrix viridana* L. (Lepidoptera: Tortricidae) in İndağı (İlgaz, Çankırı) oak (*Quercus* sp.) forests. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi* **2019**, 5(2), 86–99.
- Mannai, Y.; Ezzine, O.; Jamâa, M. L. Oak forests infestation by *Tortrix viridana* L. and its performance on three *Quercus* species. *Tunisian Journal of Plant Protection* **2018**, 13, 171–181.
- Mannu, R.; Olivieri, M.; Ruiiu, L.; Serra, G.; Fadda, M. L.; Lentini, A. Application timing affects the efficacy of *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* against *Tortrix viridana* in deciduous oak forests. *Biological Control* **2024**, 198, 105631.
- Masek, J. G.; Hayes, D. J.; Joseph Hughes, M.; Healey, S. P.; Turner, D. P. The role of remote sensing in process-scaling studies of managed forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* **2015**, 355, 109–123.
- Mngadi, M.; Germishuizen, I.; Mutanga, O.; Naicker, R.; Maes, W. H.; Odebiri, O.; Schroder, M. A systematic review of the application of remote sensing technologies in mapping forest insect pests and diseases at a tree-level. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* **2024**, 36, 101341.
- Mohammadi, A.; Bavaghar, M. P.; Shabanian, N. Detection of oak stands dieback using remote sensing (Case study: Some parts of Lorestan Province forests). *Iranian Journal of Forests and Rangelands Protection Research* **2021**, 18(2), 244–253. (In Persian).
- Moradi, M. J.; Kiadaliri, H.; Kafaky, S. B.; Bakhoda, H. Investigation of the efficiency of MaxEnt, TOPSIS and InVEST models on site suitability and decline potential of Persian oak forests in Zagros, Iran (Ilam Province). *CERNE* **2023**, 29, e103135.
- Mori, N.; Kawatsu, K.; Noriyuki, S.; Kosilov, A.; Martemyanov, V.; Yamashita, M.; Inoue, M. N. Monitoring and prediction of the spongy moth (*Lymantria dispar*) outbreaks in mountain landscapes using a combination of Sentinel-2 images and nonlinear time series model. *Forest Ecology and Management* **2024**, 563, 121975.
- Noda, T.; Kagoshima, K.; Uemori, A.; Yasutake, K.; Ichikawa, M.; Ohba, M. Occurrence of *Bacillus thuringiensis* in canopies of a natural lucidophyllous forest in Japan. *Current Microbiology* **2009**, 58 (3), 195–200.
- Orgel, F.; Wolf, C. A.; Schroeder, H. Performance of a specialist and a generalist herbivorous moth on different *Quercus robur* genotypes. *Biology and Life Sciences Forum* **2020**, 4 (1), 49.
- Seifi, S.; Madadi, H.; Ghobari, H.; Bavaghar, M. Studying the effective factors of spatial

- distribution in Mariwan oak forests. Iranian Journal of Forest and Range Protection Research **2024**, 21 (2), 349-337. (In Persian)
- Spruce, J. P.; Hicke, J. A.; Hargrove, W. W.; Grulke, N. E.; Meddens, A. J. Use of MODIS NDVI products to map tree mortality levels in forests affected by mountain pine beetle outbreaks. *Forests* **2019**, 10 (9), 811.
- Tudoran, A.; Nordlander, G.; Karlberg, A.; Puentes, A. A Major Forest Insect Pest, the Pine Weevil *Hylobius abietis*, Is More Susceptible to Diptera-Than Coleoptera-Targeted *Bacillus thuringiensis* Strains. *Pest Management Science* **2021**, 77 (3), 1303–1315.
- Xue, J.; Su, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. In *Journal of Sensors*; Hindawi: London, **2017**; pp 1-17.
- Zargaran, M. R.; Jamshidi, M.; Mirkala, S. R. M. The effect of cardinal directions on growth features and demographic changes of oak leaf-roller moth *Tortrix viridana* L. (Lep.: Tortricidae) in Ghabr-e-Hosein forests, Piranshahr. Iranian Journal of Forest **2017**, 8 (4), 519-532. (In Persian)

